



## ANÁLISE DE MÉTODOS PARA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS NA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE CABOS NO INTERIOR DE TUBO METÁLICO

André M. Alzamora<sup>\*1</sup> e Hélder de Paula<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Uberlândia  
Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 3N, 38408-100, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

**Resumo** – Simulações computacionais envolvendo fenômenos como transitórios eletromagnéticos, componentes harmônicas e interferência eletromagnética necessitam de modelos capazes de representar os diversos componentes do sistema em uma ampla faixa de frequências. Dentre estes modelos, há aqueles utilizados para representar cabos que requerem como dados de entrada seus parâmetros elétricos desde a frequência fundamental até vários MHz. Métodos analíticos não apresentam boa precisão quando os cabos estão sujeitos ao efeito proximidade, por isso, o Método de Elementos Finitos vem cada vez mais sendo utilizado para o cálculo de tais parâmetros. No entanto, é imprescindível a concepção de uma malha de elementos finitos de alta qualidade e que seja capaz de representar a rápida variação de determinadas grandezas em dadas regiões do domínio. Neste contexto, propõe-se a utilização de um refinamento de malha através de camadas paralelas às regiões condutoras. Os resultados obtidos foram comparados com equações analíticas e com métodos que utilizam apenas elementos triangulares para refinamento. De fato, o método proposto apresentou excelentes resultados com menor custo computacional.

**Palavras-Chave** – Parâmetros de cabos, análise de elementos finitos, modelos para alta frequência

### ANALYSIS OF FINITE ELEMENTS MESH METHODS FOR CALCULATION OF CABLE PARAMETERS INSIDE METALIC PIPE

**Abstract** - Computational simulations involving phenomena like electromagnetics transients, harmonic components and electromagnetic interference require models able to represent various system components over a wide frequency range. Among these models, there are those used to represent cables that require as input data their electrical parameters from the fundamental frequency to several MHz. Analytical methods do not show good accuracy when the cables are subjected to the proximity effect, so the Finite Element Method has been

<sup>\*</sup>andre.alzamora@outlook.com

increasingly used to calculate such parameters. However, it is essential to design a high quality finite element mesh capable to represent the rapid variation of certain quantities in given regions of the domain. In this context, a mesh refinement is proposed through layers parallel to the conductive regions. The results were compared to analytical equations and to methods that use only triangular elements for refinement. In fact, the proposed method performed excellent results with lower computational cost.

**Keywords** – Cable Parameter, finite element analysis, high frequency models

### I. INTRODUÇÃO

Muitos fenômenos na área de Engenharia Elétrica estão associados a grandezas que variam em uma ampla faixa de frequências, como nos casos que envolvem transitórios eletromagnéticos, componentes harmônicas e interferência eletromagnética [1 - 3]. Simulações computacionais se tornaram indispensáveis para a solução de problemas relacionados a tais fenômenos, no entanto, é necessário que sejam utilizados modelos capazes de reproduzir o comportamento dos diversos componentes do sistema em uma ampla faixa de frequências, desde a fundamental até vários MHz [4].

Neste contexto, diversas pesquisas compreendem a modelagem de cabos elétricos isolados, bastante comuns em ambientes industriais, para estudos em altas frequências. Alguns modelos requerem o conhecimento da resistência e da indutância do cabo em diferentes frequências [5, 6]. Para a determinação de tais parâmetros de maneira experimental, são necessários equipamentos de custo elevado, o que pode ser um problema para o pesquisador. Sendo assim, muitas equações analíticas foram elaboradas no intuito de definir os parâmetros de cabos, no entanto, elas não consideram a presença do efeito proximidade entre os condutores e são restritas para determinadas configurações e arranjos de cabos mais simples [7 - 9].

Desta maneira, tem-se utilizado cada vez mais o Método de Elementos Finitos (FEM) no cálculo dos parâmetros de cabos isolados, que consegue representar tanto o efeito proximidade entre os condutores como reproduzir modelos

mais complexos de cabo, estabelecendo-se como uma alternativa em relação aos métodos analíticos [10 - 13].

No tocante à geração da malha de elementos finitos, tem-se que diversos estudos utilizam abordagens diferentes para realizar o refino da malha em regiões que apresentam elevadas variações das grandezas consideradas. No caso da determinação dos parâmetros de cabos elétricos no interior de tubos metálicos, algumas bibliografias aplicam critérios de refinamento que envolvem a criação de elementos triangulares cujo tamanho e região onde vão ser empregados estão diretamente relacionados à profundidade de penetração pelicular [11 - 13].

Por outro lado, nos estudos que envolvem mecânica de fluidos e aerodinâmica, principalmente, há a utilização de um tipo de malha chamado *boundary layer mesh* que cria camadas paralelas em torno de uma fronteira no intuito de captar a rápida variação de determinada grandeza quando esta apresenta um maior gradiente na direção normal à mesma e menor variação nas outras direções [14]. No caso de simulações eletromagnéticas, este comportamento de variação é encontrado na densidade de corrente presente em condutores quando estes estão sob a influência do efeito pelicular, assim como nos casos que ocorrem penetração de campos eletromagnéticos em materiais condutores, ambos fenômenos diretamente relacionados à chamada profundidade de penetração. Tais fatos sugerem a utilização do refinamento da malha através de camadas paralelas às fronteiras também nos casos de cálculo de parâmetros de cabos.

Sendo assim, o intuito deste artigo é mostrar um procedimento baseado no FEM para encontrar parâmetros de cabos isolados (indutância e resistência) no interior de tubos metálicos através da aplicação de camadas paralelas às fronteiras (*boundary layer mesh*) para refinamento da malha de elementos finitos. Os resultados obtidos são confrontados com aqueles provenientes de rotinas computacionais que utilizam métodos analíticos (quando não há a presença do efeito proximidade), como também com métodos que utilizam malha de elementos triangulares baseados na profundidade de penetração pelicular para refinamento da malha. A proposta é validar e analisar a performance deste tipo de refinamento, bastante comum em outras áreas, também nos casos que envolvem cálculo de parâmetros de cabos. Para as simulações, utilizou-se o *software* Comsol 4.0.

## II. METODOLOGIA

O Método de Elementos Finitos (FEM) é uma ferramenta poderosa capaz de resolver problemas em diversas áreas da engenharia através da solução numérica de equações diferenciais parciais em um domínio que, por sua vez, é discretizado em um número finito de sub-regiões formando a chamada malha de elementos finitos. Este método vem sendo aplicado em problemas de eletromagnetismo desde a década de sessenta, e, mais tarde, incluíram os casos que envolvem a obtenção de parâmetros de cabos.

A exatidão da resposta obtida através do FEM está diretamente relacionada à quantidade e qualidade dos elementos finitos que discretizam as diferentes regiões que compõe o domínio do problema, ou seja, há uma relação direta entre o refinamento da malha e a precisão dos

resultados. Por outro lado, quanto mais refinada for determinada malha, maior será o tempo e custo de memória computacional necessários para atingir a resposta. Desta maneira, o refinamento da malha deve ser realizado de maneira otimizada e se concentrar nas regiões em que a variação das grandezas físicas é maior.

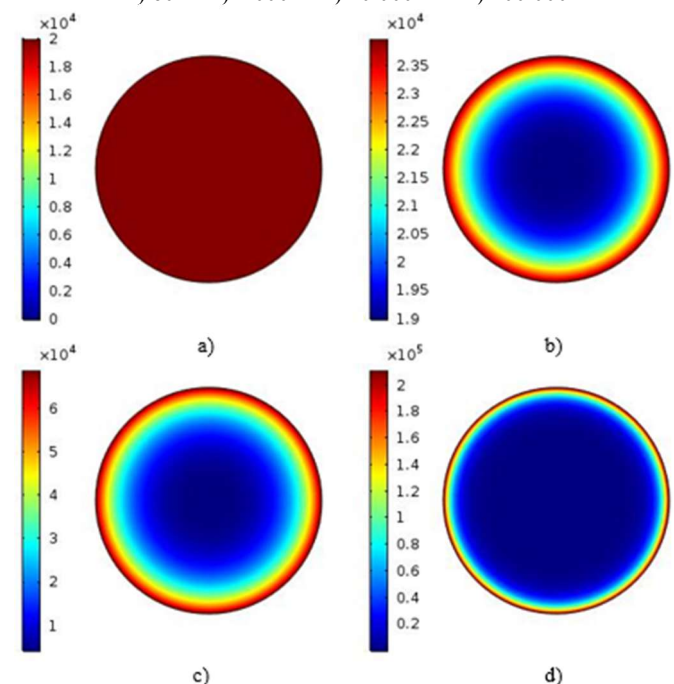
Neste contexto, as seguintes subseções discutem as estratégias adotadas na geração da malha de elementos finitos.

### A. Condutores Metálicos

A criação da malha de elementos finitos nos condutores centrais deve levar em conta, principalmente, a presença do efeito pelicular, que está associado à circulação de correntes alternadas no mesmo.

Quando o condutor é percorrido por correntes que variam no tempo, tem-se a produção de campos eletromagnéticos que também variam no tempo. Estes, por sua vez, vão dar origem às chamadas correntes parasitas. As correntes parasitas possuem direção e sentido de circulação de tal modo que atuam como incremento à corrente principal do condutor nas periferias e a reduz no centro. À medida que a frequência da corrente aumenta, mais os campos eletromagnéticos crescem e, assim, também, as correntes parasitas, pronunciando o efeito pelicular [15]. A figura 1 mostra a densidade de corrente em um condutor metálico para diferentes frequências.

Figura 1 - Densidade de corrente no condutor para as frequências de: a) 60Hz b) 1.000Hz c) 10.000Hz e d) 100.000Hz



Percebe-se através da figura anterior que à medida que a frequência da corrente que circula pelo condutor aumenta, mais fina é a camada da seção transversal do cabo pela qual se estabelece a densidade de corrente. De fato, a densidade de corrente  $J$  pode ser definida em função da profundidade  $r$  medida a partir da superfície do condutor, conforme mostra a equação 1.

$$J(r) = J_s \cdot e^{-r/\delta} \quad (1)$$

Onde:

- $r$  - Raio medido a partir da superfície do condutor.
- $J(r)$  - Densidade de corrente a uma profundidade  $r$ .
- $J_s$  - Densidade de corrente na superfície do condutor.
- $\delta$  - Profundidade de penetração pelicular.

Através da equação 1, verifica-se que a densidade de corrente diminui exponencialmente a partir da superfície do condutor. Para  $r=\delta$ , por exemplo, tem-se um valor de densidade de corrente equivalente a 37% da densidade de corrente que circula na superfície do condutor e, para  $r=5\delta$ , esse valor é de 0,67%. A profundidade de penetração  $\delta$  é, por sua vez, definida pela equação 2.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{w\mu\sigma}} \quad (2)$$

Onde:

- $w$  - Frequência da corrente.
- $\mu$  - Permeabilidade magnética do material.
- $\sigma$  - Condutividade do material.

A análise das equações anteriores permite concluir que a malha de elementos finitos gerada no condutor deve ser mais refinada na região circular que compreende a superfície do mesmo até uma espessura de  $5\delta$ , pois nessa região é onde ocorre uma maior variação da densidade de corrente. Após determinar a região onde deve ser realizada o refino da malha de elementos finitos, deve-se definir o método a ser empregado para este refino, para isso, analisou-se um método já proposto em algumas bibliografias para o cálculo de parâmetros de cabo em comparação com um que produz camadas paralelas às fronteiras.

A partir do primeiro método analisado [11 - 13], definiu-se que os elementos triangulares que compõem a malha na região circular medida a partir da superfície até uma espessura de  $5\delta$ , deve possuir uma aresta de tamanho máximo igual a  $\delta$  no intuito de considerar a rápida variação da densidade de corrente. A figura 2 mostra o condutor metálico após a realização do refinamento de malha com elementos triangulares cujos tamanhos se baseiam na profundidade de penetração.

Na abordagem proposta, a realização da malha consiste no fato de que a grandeza considerada, neste caso, a densidade de corrente, varia fortemente na direção normal à fronteira do condutor e muito pouco ao longo de linhas circulares concêntricas ao condutor. Neste caso, pode-se utilizar uma malha com subdivisões paralelas espaçadas entre si de  $\delta$ , formando camadas, tal estratégia é conhecida mais comumente como *boundary layer mesh* e é bastante empregada em problemas de viscosidade. A figura 3 mostra este refinamento de malha aplicado ao condutor metálico.

Figura 2 - Refinamento da malha do condutor metálico utilizando elementos triangulares: a) visão geral b) visão aproximada

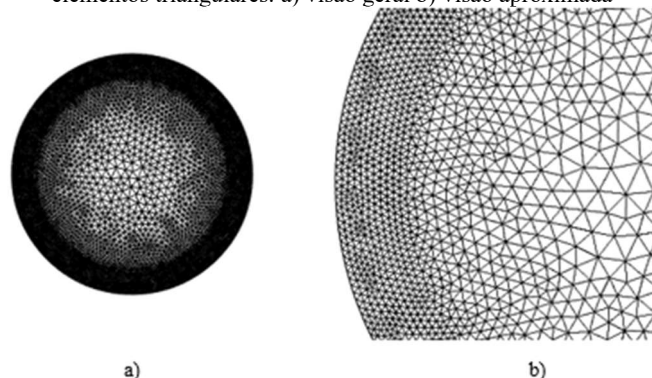
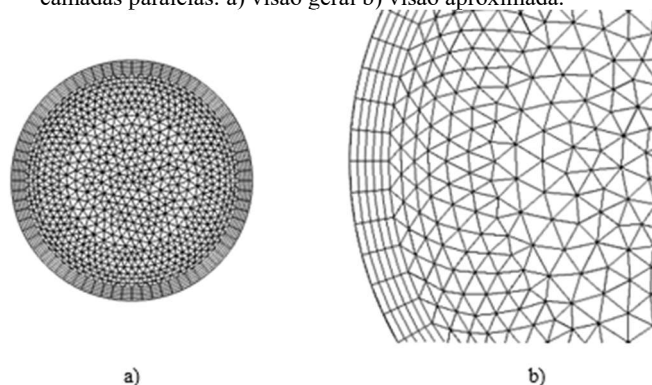


Figura 3 - Refinamento da malha do condutor central utilizando camadas paralelas: a) visão geral b) visão aproximada.



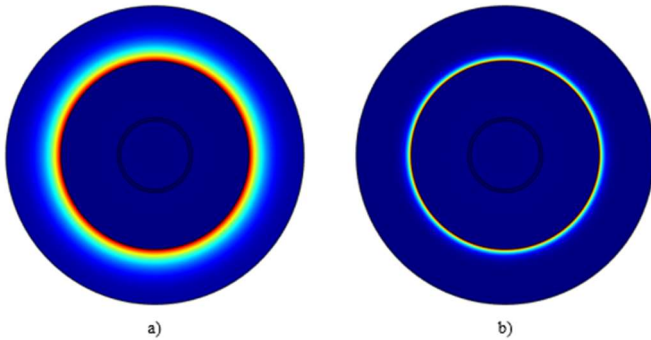
Em termos de valores de resistência e indutância, ambos métodos apresentaram excelentes precisões. No entanto, o método que envolve a utilização de elementos triangulares refinados apresentou um maior custo computacional visto que ele apresenta uma maior quantidade de equações, que estão associadas aos nós, a serem resolvidas.

### B. Tubo Metálico

Como os cabos estão distribuídos no interior de um tubo metálico, tem-se que o mesmo se apresenta como um meio condutor por onde circulam as correntes de retorno. Além disso, são induzidas correntes no tubo devido à variação de fluxo magnético no mesmo, produzido pelas correntes alternadas que circulam pelos cabos isolados. Quando a profundidade de penetração dos campos eletromagnéticos no tubo metálico é menor que sua própria espessura, não há tensão induzida além do tubo e as correntes de retorno e induzidas se mantêm confinadas no mesmo, possibilitando uma simplificação do domínio do problema através da exclusão da terra.

Como no caso do condutor central, a malha de elementos finitos deve ser refinada na região interna do tubo, que está sujeita a uma maior variação dos campos eletromagnéticos induzidos. A figura 3 mostra a densidade de fluxo magnético no tubo metálico quando circula correntes de 60Hz e 1.000Hz pelo cabo.

Figura 4 - Densidade de fluxo magnético no tubo metálico para correntes circulando pelo cabo com frequências de: a) 60Hz e b) 1.000Hz



A profundidade de penetração, dada pela equação 2, mais uma vez define o quanto os campos conseguem permear o tubo metálico. A estratégia de refinar através de elementos triangulares com tamanho máximo de aresta de  $\delta$  na região compreendida entre a superfície interna do tubo até uma espessura de  $5\delta$  apresentou elevado custo computacional, principalmente, para frequências acima de 100.000kHz, visto que os triângulos se tornaram extremamente pequenos produzindo um número elevado de equações a serem resolvidas. Com isso, teve-se que realizar adaptações no método, como diminuir a região de refino e aumentar o tamanho do triângulo. A tarefa de encontrar um equilíbrio entre custo computacional, tamanho da malha de refinamento e precisão nos resultados, é bastante laboriosa e pode variar de caso a caso, por depender da frequência de cálculo, do tamanho do tubo, da quantidade, dimensão e característica física de cada cabo, além do número de condutores metálicos em cada cabo. Por outro lado, o método das camadas paralelas para definir o refinamento da malha se mostrou muito mais interessante, pois, mesmo em altas frequências, a simulação não se tornou custosa e pôde-se manter a mesma estratégia de refino (malha com subdivisões paralelas espaçadas entre si de  $\delta$ ) independentemente de qualquer característica diferente do sistema, inclusive, de frequência.

### III. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

Inicialmente, no intuito de validar a metodologia proposta, a mesma foi comparada com métodos analíticos que, conforme já explicitado, não consideram o efeito proximidade no cálculo dos parâmetros de cabos. Portanto, elaborou-se um estudo de caso de um sistema trifásico colocado em arranjo trifólio simétrico cujos cabos estão afastados entre si e do tubo metálico de 10 diâmetros (refere-se ao diâmetro do condutor central com a isolamento), desta maneira, apenas o efeito pelicular tem influência sobre o cálculo dos parâmetros série do cabo. Os dados do cabo e do tubo utilizados são mostrados nas tabelas I e II, respectivamente. A figura 5 mostra o arranjo final obtido.

A tabela III exibe as diferenças entre os resultados obtidos através do FEM utilizando a malha refinada com camadas paralelas em comparação com aqueles obtidos através das equações analíticas (*Cable Constants* – ATP [16]) para diversas frequências. Na tabela, Rp e Lp são as resistências e indutâncias próprias, enquanto que Rm e Lm são as resistências e indutâncias mútuas dos cabos; por se tratar de

um sistema simétrico, tais valores são idênticos para todos os cabos.

Tabela I – Dados do cabo elétrico.

	Raio Interno (mm)	Condutividade (MS/m)	Permissividade elétrica	Permeabilidade magnética
Condutor Central	4	34,06	-	1
Isolante externo	4,34	-	5,10	1

Tabela II - Dados do tubo metálico.

	Raio Interno (mm)	Raio Externo (mm)	Condutividade (MS/m)	Permissividade elétrica	Permeabilidade magnética
Tubo Metálico	146,265	152,665	5	5,10	400

Figura 5 – Cabos dispostos em arranjo trifólio simétrico distantes entre si e do tubo metálico.

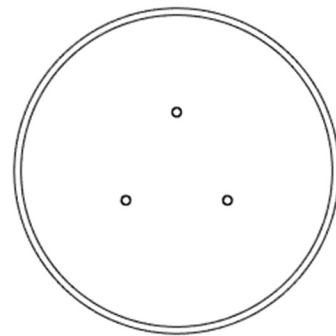


Tabela III - Diferenças percentuais entre os parâmetros série fornecidos pelo FEM e os seus correspondentes gerados pelo ATP.

Frequência (kHz)	Rp	Lp	Rm	Lm
60	0,003%	0,025%	0,008%	0,063%
1	0,240%	0,005%	0,412%	0,076%
10	0,261%	-0,047%	0,536%	-0,126%
100	0,215%	-0,062%	0,521%	-0,240%
1000	0,327%	-0,066%	0,519%	-0,279%

Pode-se concluir através da tabela anterior que a metodologia proposta apresenta alta precisão no cálculo dos parâmetros série do cabo. Portanto, pode-se abranger esta análise para o caso em que o efeito proximidade se faz presente e espera-se uma divergência ao comparar os resultados obtidos pelo FEM entre aqueles obtidos por meio de métodos analíticos, visto que este último não considera o referido fenômeno.

#### A. Efeito Proximidade

Enquanto o efeito pelicular é responsável por distribuir a densidade de corrente de maneira uniforme em uma camada muito próxima à da superfície do próprio condutor, o efeito proximidade é responsável por redistribuir de maneira não-uniforme a densidade de corrente em um condutor próximo.

Quando dois condutores estão próximos entre si e circula corrente alternada pelo primeiro, campos eletromagnéticos variantes no tempo atingem o segundo, induzindo correntes no mesmo. Estas correntes induzidas possuem direção e sentido de circulação de modo a aumentar a densidade de

corrente do segundo condutor na região mais próxima ao primeiro condutor [15].

Para simular a influência do efeito proximidade sobre o cálculo dos parâmetros de cabos no interior de um tubo metálico, os condutores foram colocados em um arranjo trifólio espaçados entre si e do tubo a uma distância de um milímetro. A figura 6 mostra este arranjo e, para exemplificar o efeito proximidade, também exibe as densidades de correntes induzidas nos cabos inferiores quando é aplicada uma corrente de 1.000Hz no cabo superior. Utilizou-se o mesmo cabo mostrado na tabela I, enquanto que o tubo metálico utilizado, desta vez, é mostrado na tabela IV.

Figura 6 – Demonstração da influência do efeito proximidade na densidade de corrente dos três cabos quando o condutor superior está submetido à uma corrente de 1.000Hz.

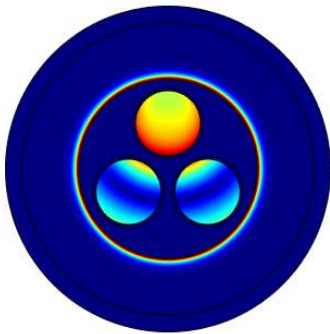


Tabela IV – Dados do tubo metálico.

	Raio Interno (mm)	Raio Externo (mm)	Condutividade (MS/m)	Permissividade elétrica	Permeabilidade magnética
Tubo Metálico	10,929	17,929	3,91	5,10	400

Os resultados obtidos foram comparados com aqueles provenientes do ATP e são mostrados na tabela V.

Tabela V - Diferenças percentuais entre os parâmetros série fornecidos pelo FEM e os seus correspondentes gerados pelo ATP.

Frequência (kHz)	Rp	Lp	Rm	Lm
60	0,042%	-0,102%	-0,036%	0,259%
1	2,313%	-2,454%	-0,315%	1,335%
10	0,727%	-11,102%	0,939%	4,836%
100	-8,215%	-17,742%	8,157%	5,737%
500	-14,437%	-18,459%	17,707%	-3,184%
1000	-15,209%	-18,412%	22,217%	-9,088%

Conforme mostra a tabela acima, houve uma grande divergência nos valores quando comparados aqueles obtidos pelo FEM e aqueles provenientes de métodos analíticos (ATP), o que era esperado, visto que este último não considera a presença do efeito proximidade. Resultados positivos indicam que o parâmetro encontrado no FEM apresenta um maior valor.

A tabela VI, por sua vez, compara os valores de resistências e indutâncias próprias e mútuas, quando utilizado o refinamento através de camadas paralelas em comparação com o que utiliza elementos triangulares.

Tabela VI - Diferenças percentuais entre os parâmetros série fornecidos pelo FEM quando utilizado o refinamento de malha de elementos finitos através de camadas paralelas e através de elementos triangulares.

Frequência (kHz)	Rp	Lp	Rm	Lm
60	-0,371%	0,664%	-0,471%	0,691%
1	-0,467%	0,506%	-0,497%	0,573%
10	-0,440%	0,556%	-0,424%	0,565%
100	-1,692%	1,397%	-1,670%	2,091%
500	-1,605%	0,956%	-1,516%	1,539%
1000	-1,879%	0,917%	-1,778%	1,507%

A análise da tabela VI permite concluir que o método de refinamento através de camadas paralelas consegue representar de forma satisfatória a presença do efeito proximidade mesmo ele gerando distribuições não-uniformes nos condutores. A vantagem de utilizar este método reside no fato de que o número de nós gerados pela malha de elementos finitos é bem menor, reduzindo o custo computacional, e o resultado é praticamente o mesmo daquele obtido através do refinamento por elementos triangulares, isto se deve à característica de variação das grandezas consideradas (maior na direção normal às fronteiras).

#### IV. CONCLUSÕES

O Método de Elementos Finitos é cada vez mais utilizado no cálculo de parâmetros de cabos, visto que os métodos analíticos não são capazes de considerar a presença do efeito proximidade. No entanto, o pesquisador deve estar atento no que tange a geração da malha de elementos finitos no sentido que ela deve ser capaz de calcular a rápida variação das grandezas eletromagnéticas em determinadas regiões do domínio.

O método de refinamento de malha através de camadas paralelas às fronteiras é bastante difundido em algumas áreas da física, como na mecânica de fluidos, pois ele se comporta bem quando uma grandeza varia fortemente na direção normal à fronteira mas se mantém constante em outras direções. Como este comportamento é visto também nas grandezas eletromagnéticas e de corrente quando do cálculo de parâmetros de cabo, verificou-se a utilização deste tipo de malha no referido propósito.

Os valores de resistência e indutância obtidos por este método foram comparados com aqueles extraídos por fórmulas analíticas (quando não há efeito proximidade) como também com aqueles obtidos por refinamento através de elementos triangulares. Os resultados foram bastante satisfatórios.

A vantagem de se utilizar camadas paralelas à fronteira é que, independentemente da frequência ou das características do sistema, ela apresenta baixo custo computacional com elevada precisão. Já no método dos elementos triangulares, por exemplo, em frequências muito altas, o pesquisador deve mudar o refinamento de maneira manual pois o custo computacional se torna excessivo.

Portanto, o refino de malha através de camadas paralelas pode ser utilizado de maneira satisfatória no cálculo de parâmetro de cabo através do FEM. Este estudo pode ser estendido para outros casos, como cabos sobre eletrocalhas

ou sob a superfície da terra, além também no caso de cálculos de capacitâncias

### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

### REFERÊNCIAS

- [1] A. Greenwood, *Electrical transients in power systems*, John Wiley & Sons, 2ª Edição, 1991.
- [2] J. Arrilaga e N. R. Watson, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, 2ª Edição, New Jersey, 2003.
- [3] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, John Wiley & Sons, 2ª Edição, New Jersey, 2006.
- [4] J. A. Martinez-Velasco, *Power System Transients: parameter determination*, CRC Press, 1ª Edição, New York, 2010.
- [5] H. de Paula, D. A. Andrade, M. L. R. Chaves, J. L. Domingos e M. A. A. Freitas, “Methodology for cable modeling and simulation for high-frequency phenomena studies in PWM motor drives”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 2, pp. 744-752, 2008.
- [6] M. L. R. Chaves, J. C. Oliveira, J. W. Resende e A. M. Lopes, “Time Domain Cable Modeling with Frequency Dependent Parameters”, *International Conference on Power System Transients*, pp. 275-279, 1997.
- [7] S. A. Schelkunoff, “The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields”, *Bell System Technology*, Vol 13, pp. 532-579, 1934.
- [8] G. W. Brown e R. G. Rocamora, “Surge Propagation in Three-Phase Pipe-Type Cables, Part I - Unsaturated Pipe”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-95, No. 1, pp. 89-95, 1976.
- [9] A. Ametani, “A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, No. 3, pp. 902-910, 1980.
- [10] Y. Yin e H. W. Dommel, “Calculation of Frequency Dependent Impedances of Underground Power Cables with Finite Element Method”, *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 25, N° 4, 1989.
- [11] S. Cristina e M. Feliziani, “A Finite Element Technique for Multiconductor Cable Parameters Calculation”, *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 25, N° 4, 1989.
- [12] A. Cirino, H. de Paula, R. C. Mesquita e E. Saraiva, “Cable parameter variation due to skin and proximity effects: determination by means of finite element analysis”, *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 4073-4079, Porto, Portugal, 2009.
- [13] W. L. de Souza, H. de Paula, A. de Conti e R. C. Mesquita, “Cable Parameter Calculation for Typical Industrial Installation Methods and High-Frequency Studies”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 54, 2017.
- [14] R. V. Garimella e M. S. Shephard, “Boundary Layer Mesh generation for Viscous Flow Simulations”,

*International Journal for Numerical Methods in Engineering*, pp. 193-218, 2000.

- [15] H. Johnson e M. Graham, *High-speed signal propagation: advanced black magic*, Prentice Hall, New Jersey, 1ª edição, 2013.
- [16] ATP/EMPT CanAm Users Group, *ATP Rule Book*, 1995.